

# ПЛАЗМОВО-ДУГОВА ГАРНІСАЖНА ПЛАВКА Й ЛИТТЯ АУСТЕНІТНОЇ СТАЛІ З НАДРІВНОВАЖНИМ ВМІСТОМ АЗОТУ

**В.О. Шаповалов, В.Р. Бурнашев, Т.І. Грищенко, В.В. Якуша, Ю.О. Никитенко**

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [shapovalov@paton.kiev.ua](mailto:shapovalov@paton.kiev.ua)

Показано можливість виплавки й лиття високоазотистієї сталі X21Г17АН2 в умовах плазово-дугової гарнісажної плавки. Визначено граничні умови азотування сталі X21Г17Н2 з метою отримання якісних виливків. Отримані виливки у вигляді дроту діаметром 12 мм. Вивчено якості й властивості виливків. Проведено дослідження щодо зварюваності отриманої сталі із надрівноважним вмістом азоту ручним аргонно-дуговим зварюванням. Бібліогр. 15, табл. 5, рис. 7.

*Ключові слова:* плазово-дугова гарнісажна плавка, сталь X21Г17Н2, азот, лиття, властивості, зварюваність

**Вступ.** Азот у складі легованих сталей проявляє аустенітостабілізуючі властивості і використовується у якості замітника дороговартісного нікелю, що традиційно додається для формування аустенітної фази [1–3]. Дотепер досягнуто значного прогресу в металургійному виробництві сталей, легованих азотом. Створення високоазотистих сталей із спеціальними функціональними властивостями (висока міцність, корозійна стійкість, біосумісність та ін.) стимулює ріст обсягів промислового використання азотовмісних сталей у виробництві виробів відповідального призначення [4–6]. До високоазотистих сталей прийнято відносити сталі, що містять у своєму складі азот у кількості, яка перевищує його розчинність при рівноважних умовах.

Для виробництва зливків та відливок зі сталей із надрівноважним вмістом азоту застосовуються ряд способів спеціальної електрометалургії: індукційна плавка під надлишковим тиском, електрошлаковий перепплав у контрольованій атмосфері, плазово-дуговий перепплав [7–10]. На сьогодні найбільш поширеним способом виробництва азотовмісних сталей є спосіб автоклавної індукційної плавки. Не дивлячись на поширеність цього способу, він має певні суттєві недоліки, які пов'язані із тривалим процесом виплавки і витримки рідкого металу під надлишковим тиском та складністю технологічного обладнання. А явні переваги цього способу, що мають місце при виробництві сталей із концентрацією азоту нижче рівноважної (біля 0,4 %), при отриманні високоазотистих сталей практично відсутні. На противагу згаданим плавильним процесам, при плазово-дуговому перепплаві азотовмісних сталей із

поверхнею рідкого металу азот додатково взаємодіє у збудженому стані, що надає можливість отримати надрівноважну його концентрацію у металі та суттєво інтенсифікувати абсорбційний процес, скоротивши на порядок тривалість обробки [8]. Відносна простота технологічного обладнання, здійснення перепплавлення металу при суттєво менших тисках газу, відсутність потреби у довготривалій витримці рідкого металу під надлишковим тиском показують перспективність плазово-дугових процесів при отриманні сталей з понадрівноважним вмістом азоту.

Поряд із необхідністю виробництва зливків із високоазотистих сталей не менш важливим є отримання фасонних виливків із них. Підвищення вимог до якості виливків, а також розширення виробництва литих виробів із високоазотистих сталей потребує розробки нових технологічних рішень, що забезпечать високу якість виплавленого та відлитого металу. Комплекс практичних заходів для покращення якості литва головним чином спрямовується на удосконалення процесів: плавлення та оброблення рідкого металу, включаючи розкислення, рафінування, легування; розливання металу у форми за режимами, що забезпечуватимуть високі фізико-механічні властивості відливок; інжинірингу ливарних форм на основі матеріалів із високими фізико-механічними і теплофізичними властивостями для забезпечення максимального наближення розмірів виливків до розмірів готових деталей.

Як різновид плазово-дугових процесів спосіб плазово-дугової гарнісажної плавки [11, 12] дозволяє проводити виплавку і розливання азотовмісних сталей в одному технологічному агрегаті. Для

В.О. Шаповалов — <http://orcid.org/0000-0003-1339-3088>, В.Р. Бурнашев — <http://orcid.org/0000-0001-6807-3810>,

Т.І. Грищенко — <http://orcid.org/0000-0001-7840-9832>, В.В. Якуша — <http://orcid.org/0000-0001-5962-9194>,

Ю.О. Никитенко — <http://orcid.org/0000-0002-3603-2333>

виплавки якісного металу та забезпечення високих техніко-економічних показників процесу плавки гарнісажний тигель має відповідати наступним вимогам: виключати взаємодію матеріалу тигля з розплавленим металом; забезпечувати необхідний час витримки металу у рідкому стані; забезпечувати максимальний коефіцієнт зливання металу ( $K_{зл}$ ).

Виключити взаємодію рідкого металу з матеріалом тигля можливо при використанні металевого, наприклад, мідного водоохолоджуваного тигля, що покращує умови експлуатації плавильного агрегату та сприяє якості виливок.

Розробка способів з'єднання азотовмісних сталей за допомогою способів зварювання має одне із першочергових значень для раціонального виробництва як окремих деталей, так і елементів конструкцій із них [6, 13]. Аустенітні сталі з надрівноважним вмістом азоту мають обмежену зварюваність дуговими способами зварювання. Сталі, що містять від 0,5 % азоту, схильні до пористості. На пористість швів при зварюванні впливають не тільки абсолютний вміст азоту, але й умови існування зварювальної ванни (об'єм, форма, швидкість зварювання, температура підігріву). Зазначається, що зниження погонної енергії зварювання сприяє зменшенню сумарної кількості дефектів та їх розмірів. Зменшення струму зварювання до 80 А і збільшення числа проходів до 3–4 сприяє зниженню загальної кількості пор у швах [14].

**Мета досліджень.** Мета досліджень, проведених у цій роботі, полягала у відпрацюванні технологічних режимів плазово-дугової гарнісажної плавки (ПДГП) та відливання економнолегованої нікелем аустенітно-феритної сталі X21Г17Н2 з надрівноважним вмістом азоту, вивченні особливостей впливу азоту на її структуру, визначенні параметрів ТІГ зварювання зразків високоазотистої сталі та характеристик зварного з'єднання.

**Обладнання та матеріали.** Дослідження технологічних особливостей процесу ПДГП та лиття високоазотистої сталі було проведено в плазово-дуговій гарнісажній установці УПГ-1Л розробки ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України (рис. 1). Плазово-дугову установку оснащено мідним водоохолоджуваним тиглем об'ємом 1000 см<sup>3</sup> (рис. 2) і плазмотронами постійного струму типу ПДМ-7 з допустимим струмом до 500 А.

Плавильно-розливочні агрегати з радіальною схемою нагріву дозволяють у залежності від необхідності або розосереджувати підведення тепла до поверхні ванни, або сконцентрувати його в заданих зонах, регулюючи обігрів різних ділянок ванни рідкого металу. При такій схемі нагрівання поверхня заготовки, що переplавляється, частко-

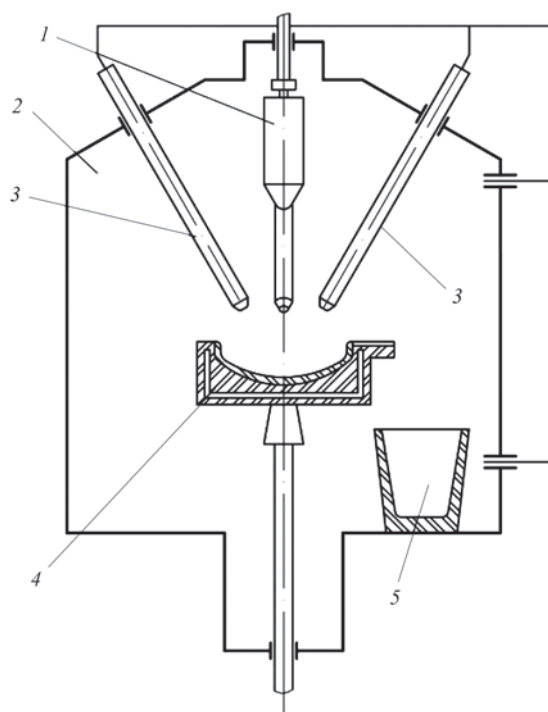


Рис. 1. Принципова схема плазово-дугової установки УПГ-1Л: 1 — витратна заготовка; 2 — камера печі; 3 — плазмотрони ПДМ-7; 4 — тигель; 5 — виливниця

во екранує випромінювання плазових дуг, що підвищує тепловий ККД плавки.

У якості вихідного матеріалу для досліджень було вибрано двофазну аустенітно-феритну сталь X21Г17Н2. Для отримання марочного хімічного складу використовували хром марки Х98, залізо Агтсо, нікель катодний марки Н1, марганець металевий МР-1. З вихідної шихти в умовах ПДГП в атмосфері аргону було виплавлено зразки сталі, хімічний склад яких наведено у табл. 1.

Результати хімічного аналізу сталі плавки 1 показали занижений вміст марганцю та нікелю порівняно з розрахунковими значеннями. Коректування складу шихтових матеріалів для послі-



Рис. 2. Мідний водоохолоджуваний тигель

Таблиця 1. Хімічний склад виплавленої сталі, мас. %

Плавка	Cr	Mn	Ni	C	S	P	[O]	[N]
1	20,4	13,9	1,67	0,1	0,025	0,02	0,042/0,03	0,016/0,73
2	20,9	16,8	1,90	→→	→→	→→	→→	0,018/0,74
3	21,0	16,9	2,10	→→	→→	→→	0,023/0,028	0,017/0,90

Примітка. Вміст [O] та [N] у чисельнику — вихідний метал, у знаменнику — метал після азотування.

дуючих плавок 2 та 3 забезпечили виплавку сталі необхідного марочного складу. Отримані склади сталей були використані для виплавки зразків із надрівноваженою концентрацією азоту.

**Експериментальні дослідження.** Плавлення аустенітної сталі X21Г17АН2 з надрівноважним вмістом азоту. В умовах надлишкового тиску газу в плавильній камері і розосередженого нагріву ванни рідкого металу практично відсутнє випаровування хрому, спостерігаються незначні втрати марганцю, які можуть дещо зростати зі зменшенням загального тиску газу та збільшенням витрат плазмоутворюючого газу.

Для відповідного хімічного складу виплавлених сталей (табл. 1) за допомогою рівняння, наведеного в роботі [10], було розраховано залежність розчинності азоту від температури розплаву і парціального тиску азоту в атмосфері печі:

$$\lg k = -\frac{293}{T} - 1,16 - \left(0,042 - \frac{167}{T}\right)[Cr \%] - 0,5\left(\frac{3,3}{T} - 0,001\right)[Cr \%]^2 - \left(0,022 - \frac{73}{T}\right)[Mn \%] - \left(\frac{18,4}{T} + 0,00042\right)[Ni \%] - \left(\frac{171}{T} - 0,031\right)[Si \%] - \left(\frac{274}{T} - 0,06\right)[C \%] - \left(\frac{1640}{T} - 1,14\right)[O \%] - \left(\frac{859}{T} - 0,487\right)[Al \%]$$

Згідно з проведеними розрахунками, стандартна розчинність азоту в сталях за температури розплаву 1873 К складала 0,49 і 0,57 % відповідно для плавки 1 та плавок 2 і 3. Визначено, що з підвищенням температури розплаву на 100 К стандартна розчинність азоту в металі в середньому знижується на 17 %, а при підвищенні парціального тиску азоту в пичній атмосфері на 100 кПа зростає на 40 %.

Таблиця 2. Параметри тиску і складу плазмоутворюючої суміші газів

Плавка	Робочий тиск у камері, кПа	Вміст азоту в газовій суміші, об. %	Парціальний тиск азоту під час плавлення, кПа
1	185	85...86	160
2	200	→→	170
3	210	→→	180

Розрахункові дані розчинності азоту були використані при відпрацюванні технологічних режимів ПДГП сталі X21Г17Н2 з надрівноважним вмістом азоту. Експериментальні плавки проводили в печі УПГ-1Л з використанням плазмоутворюючої суміші газів азоту і аргону. Витрати газу складали 80 л/хв. Плавлення та витримку металу проводили при струмі на плазмотронах 280...300 А і напрузі 70 В. Відповідно до даних табл. 2 підтримували необхідний робочий тиск газів в камері печі та забезпечували заданий парціальний тиск азоту.

Отримання виливків із аустенітної сталі X21Г17АН2 з надрівноважним вмістом азоту. Спосіб ведення плавки при надмірному тиску азоту дозволяє обробляти метал не тільки під час плавки, витримки і розливання, а й під час його кристалізації. Це значно розширює можливість управління газоусадковими, ліквідаційними та іншими процесами при формуванні структури виливків для підвищення щільності та інших фізико-механічних властивостей металу.

Основна проблема виплавки зливків і виливків зі сталей з надрівноважним вмістом азоту пов'язана з високою вірогідністю утворення газової пористості в металі при його твердінні. Відомо, що гранична концентрація азоту при плазово-дуговій обробці розплаву технологічно визначається азотним кипінням металевої ванни, що свідчить про досягнення динамічної рівноваги сорбційного процесу при даних термодинамічних умовах [8, 15]. Її величина визначається умовами існування бульбашок газу в об'ємі розплаву і знаходиться у рівновазі з загальним тиском газів у печі, а не з парціальним тиском азоту. Подальше збільшення парціального тиску азоту не впливає на його вміст у металі. Початок азотного кипіння ванни залежить від швидкості абсорбції азоту, умов конвекції, стандартної розчинності азоту в розплаві та загального тиску газу в плавильній камері.

Використання такого технологічного прийому, як підвищення тиску газу в камері печі під час виливання металу у виливницю, дає змогу пригнічувати десорбцію розчиненого азоту в металі й запобігати утворенню газової пористості. В роботі [11], присвяченій ПДГП відповідального литва зі сталі 0X20H5AG2 з надрівноважним вмістом

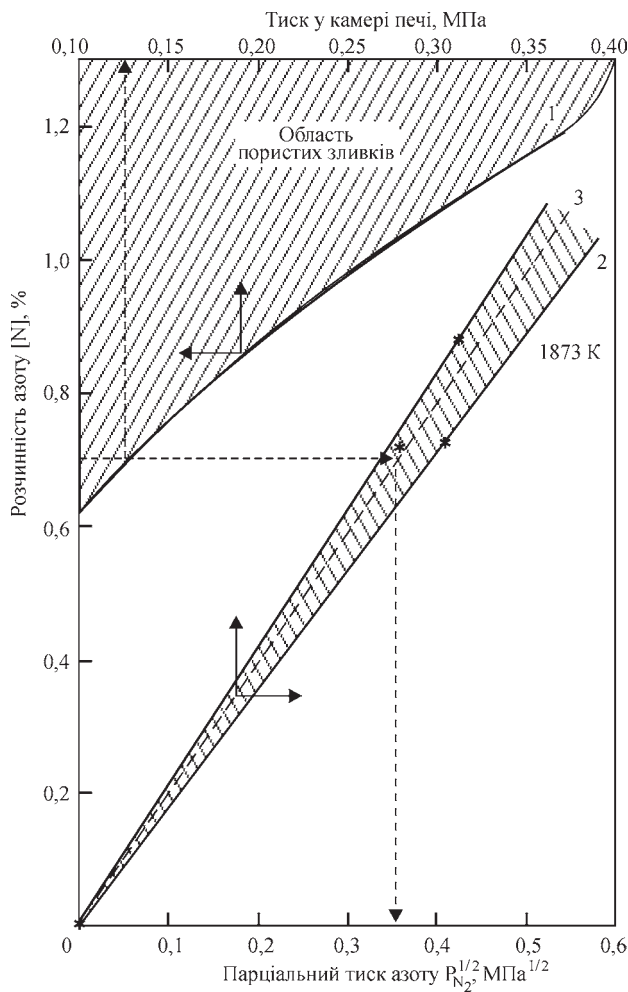


Рис. 3. Номограма для визначення граничного тиску при розливі в умовах ПДГП сталей, легованих азотом: 1 — розчинність азоту, що розрахована за умови кипіння металеві ванни за допомогою рівняння  $[N] = S_N \sqrt{P_\Sigma}$ , де  $S_N$  — стандартна розчинність азоту, %;  $P_\Sigma$  — загальний тиск газів, атм; 2 — залежність вмісту азоту в сталі від парціального тиску азоту; 3 — ізотерма розчинності азоту в сталі при 1873 К

азоту, було запропоновано номограму для визначення граничного тиску газу в плазмово-дуговій печі, який необхідно підтримувати при розливі для отримання безпористих виливків. Керуючись теоретичними положеннями цієї праці, було побудовано відповідну номограму для досліджуваної сталі X21Г17АН2 (рис. 3). Номограма містить дві залежності, одна з яких відповідає граничній концентрації азоту в сталі в режимі азотного кипіння ванни від загального тиску газів у печі (крива 1) та друга — вмісту азоту у сталі від парціального тиску азоту (крива 2). Задаючись вмістом азоту у сталі X21Г17АН2, що необхідно отримати, проводять горизонтальну лінію до перетину з залежностями 1 і 2. Абсциси точок їх перетину відповідно показують граничний тиск газів у камері печі при розливанні металу для забезпечення щільних литих

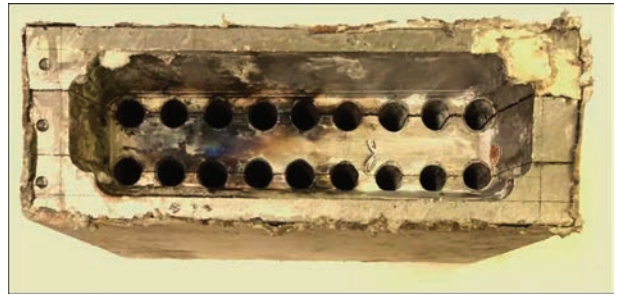


Рис. 4. Роз'ємна сталева виливниця (кокіль)

виробів і парціальний тиск азоту, який необхідний для отримання металу із заданим вмістом азоту.

У якості виливниці в експериментах використовували роз'ємний сталевий кокіль (рис. 4), який у результаті разової заливки забезпечував кристалізацію металу у формі циліндричних прутків (18 шт) діаметром 12 мм і довжиною 180 мм (рис. 5). Після розплавлення металу і наведення ванни розплав витримували протягом 10...15 хв в умовах плазмово-дугового нагріву при заданому парціальному тиску азоту, уникаючи можливості його азотного кипіння, а потім виливали оброблений метал у виливницю. Під час розливання металу тиск газів у печі та склад плазмовоутворюючої суміші підтримували згідно з даними, що наведені у табл. 2.

Із отриманих виливків були підготовлені поздовжні макрошліфи для вивчення литої структури прутків і відібрані зразки для хімічного та газового аналізу.

Дослідження TIG зварювання зразків із аустенітної сталі X21Г17АН2, легованої азотом\*. Зварюваність високоазотистой сталі X21Г17АН2 була досліджена на прикладі ручного аргоно-дугового зварювання з неплавким вольфрамовим катодом. З цією метою із прутків за допомогою прокатки були отримані пластини товщиною 6 та 3 мм. Із пластин товщиною 6 мм безпосередньо були виготовлені прямокутні зразки для відпрацювання технології зварювання. Зі сторони зварювання на суміжних



Рис. 5. Зовнішній вигляд виливниці з відлитими прутками

\*Експерименти зі зварюваності сталі виконав Денис Петров.

Таблиця 3. Режими ручного аргано-дугового зварювання

Зразок	Наруга, В	Струм, А	Склад газу, %		Витрати газу, л/хв	Швидкість зварювання, см/с	Кількість проходів
			Ar	N <sub>2</sub>			
1	20	100	80	20	10	0,20	2 з кожної сторони
2	18	80	90	10	«-»	0,15	—»—

Таблиця 4. Механічні властивості зварного з'єднання

Місце відбору проб	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	КС, МДж/мм <sup>2</sup>	Місце руйнування
Основний метал	841	933,0	25,9	42,7	1,45	—
Шов	540	860,0	28,0	41,2	1,58	Шов

гранях зразків з обох сторін виконано фрезерування кромки. Пластини товщиною 3 мм були використані для отримання присадкового матеріалу у вигляді так званої «лапші». Таким чином, для TIG зварювання зразків сталі X21Г17АН2 були використані присадкові електроди з тієї ж марки сталі. Зварювання зразків проводили у стик, виконуючи його у два проходи з обох сторін, згідно з режимами зварювання, які наведені у табл. 3.

З одержаних зразків зварних з'єднань були підготовлені макрошліфи поперечного перерізу для дослідження структури металу у зоні з'єднання. Додатково досліджено механічні властивості зварних з'єднань та вміст азоту й кисню в них.

**Обговорення результатів.** У підсумку проведених експериментів було відпрацьовано технологічні режими легування азотом з газової фази сталі аустенітно-феритного класу X21Г17АН2 при плазмово-дуговій гарнісажній плавці та її розливки у сталевий кокіль. Були отримані виливки із високоазотистої сталі у формі прутків малого діаметру. Результати газового аналізу прутків за К'ельдалем, які наведені в табл. 1, показують, що вміст азоту у прутках усіх трьох партій перевищує стандартну розчинність азоту більше ніж в 1,3 рази, складаючи 0,73, 0,74 та 0,9 % для плавки 1, 2 і 3 відповідно. Порівнюючи отримані концентрації з розрахунковими значеннями рівноважного вмісту азоту при 1873 К, було встановлено, що режими

азотування, яких дотримувалися під час плавки 1 і 3, забезпечили у виливках концентрацію азоту, яка відповідно на 7 та 15 % перевищує рівноважну. Дослідження литої структури прутків показали, що прутки першої і другої плавки щільні, без видимих пор та неметалевих включень у полі зору макрошліфів (рис. 6). У обох випадках заливку металу у кокіль проводили при загальному тиску газів у печі, що перевищував граничний тиск газів, визначений за номограмою (рис. 3). У тілі прутків третьої плавки були виявлені крупні пори діаметром від 0,5 до 2,0 мм у всьому полі шліфа. Не дивлячись на те, що заливку металу проводили при тиску, який у точності відповідав граничному (рис. 4), його для даної концентрації азоту виявилось недостатньо, щоб запобігти формуванню газової пористості. Отже, для пригнічення розвитку цього процесу необхідно під час розливки підтримувати тиск з певним надлишком над визначеним за номограмою.

Виконані дослідження зварюваності високоазотистої сталі X21Г17АН2 показали, що механічні властивості зварного шва та основного металу знаходяться в межах очікуваного (табл. 4). Відмічається дещо знижена межа міцності ( $\sigma_{\text{в}}$ ), межа плинності ( $\sigma_{0,2}$ ) металу шва, але підвищене відносне подовження ( $\delta$ ) та ударна в'язкість (КС).

Аналіз вмісту газових домішок у зварному з'єднанні показав, що порівняно з основним металом має місце певне зниження кисню, а концентрація азоту практично не змінюється (табл. 5). Запропоновані режими зварювання забезпечують формування з'єднання з ванною обмежених розмірів і малим часом її існування, що, вірогідно, не дає можливості розвитку реакції десорбції азоту з металу шва та утворення пористості.

Металографічні дослідження зварного шва і основного металу (рис. 7) показали, що їх мікроструктура є повністю аустенітною. Пористості, тріщин та інших дефектів у з'єднанні не виявлено. Розглядаючи вищенаведені дані, можна ствер-



Рис. 6. Макроструктура повздовжнього перерізу прутків з різним вмістом азоту, %: 1 — 0,73; 2 — 0,74; 3 — 0,9

Таблиця 5. Вміст газових домішок у металі шва зварного з'єднання сталі Х21Г17АН2

Газові домішки	Основний метал	Метал шва				
		1	2	3	4	5
[O]	0,042	0,033	0,028	0,032	0,036	0,034
[N]	0,74	0,74	0,73	0,74	0,73	0,74

Примітка. 1, 2, 3, 4, 5 — зразки, що відібрані через 25 мм по довжині зварювального шва.

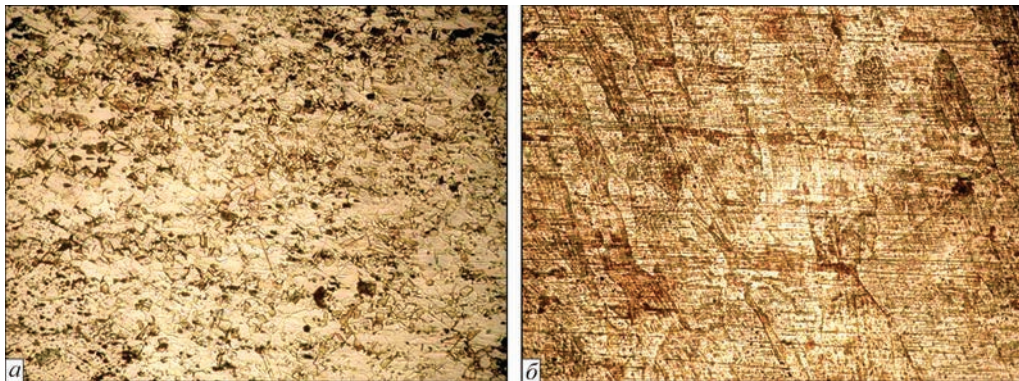


Рис. 7. Мікроструктура (×100) основного (деформованого) металу (а) та зварного шва (б)

джувати, що зварюваність високоазотисті сталі Х21Г17АН2 є задовільною.

**Висновки**

1. Проведені дослідження показали, що технологія ПДГП дає можливість ефективно проводити легування азотом із газової фази економнолегованої нікелем сталі Х21Г17АН2 з отриманням виливок з надрівноважним вмістом азоту та аустенітною структурою.

2. Встановлено, що для отримання виливок без дефектів у вигляді пор необхідно проводити розливку сталі Х21Г17АН2 при загальному тиску газів у плазмовій печі, що перевищує граничний тиск газів, визначений за допомогою номограми.

3. Експерименти щодо зварюваності сталі Х21Г17АН2 показують, що запропоновані режими ручного аргоно-дугового зварювання забезпечують задовільні механічні характеристики зварного з'єднання, без пористості і тріщин у зоні термічного впливу та металі шва.

**Список літератури**

1. Uggowitz P.J., Magdowski R., Speidel M.O. (1996) Nickel free high nitrogen austenitic steels. *ISIJ Inter.*, 36(7), 901–908. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.36.901>
2. Gavriljuk V., Petrov Y., Shanina B. (2006) Effect of nitrogen on the electron structure and stacking fault energy in austenitic steels. *Scr. Mater.*, 55, 537–540. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2006.05.025>
3. Nithi Saenarjhan, Jee-Hyun Kang, Sung-Joon Kim (2019) Effects of carbon and nitrogen on austenite stability and tensile deformation behavior of 15Cr–15Mn–4Ni based austenitic stainless steels. *Materials Sci. and Eng., A*, 742, 608–616. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.11.048>

4. Patnaik L., Maity S.R., Kumar S. (2020) Status of nickel free stainless steel in biomedical field: A review of last 10 years and what else can be done. *Mater. Today Proc.*, 26, 638–643. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.205>
5. Chail G., Kangas P. (2016) Super and hyper duplex stainless steels: structures, properties and applications. *Procedia Structural Integrity*, 2, 1755–1762. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.221>
6. Mohammed R., Madhusudhan Reddy G., Srinivasa Rao K. (2017) Welding of nickel free high nitrogen stainless steel: Microstructure and mechanical properties. *Defence Technology*, 13(2), 59–71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2016.06.003>
7. Шейко И.В., Григоренко Г.М., Шаповалов В.А. (2016) Легирование сталей и сплавов азотом из дуговой плазмы: теория и практика (Обзор, часть 1). *Современная электрометаллургия*, 1, 32–37.
8. Патон Б.Е., Григоренко Г.М., Шейко И.В. и др. (2013) *Плазменные технологии и оборудование в металлургии и литейном производстве*. Киев, Наукова думка.
9. Nabil Ghali S., Eissa M., El-Faramawy H. et al. (2013) Production and application of advanced high nitrogen steel. *Proc. of Inter. Conf. on Sci. and Technology of Ironmaking and Steelmaking* At. Jamshedpur, India, 1. DOI: [https://www.researchgate.net/publication/262698868\\_Production\\_and\\_Application\\_of\\_Advanced\\_High\\_Nitrogen\\_steel](https://www.researchgate.net/publication/262698868_Production_and_Application_of_Advanced_High_Nitrogen_steel)
10. Бурнашев В.Р., Никитенко Ю.О., Якуша В.В. та ін. (2020). Деякі аспекти виплавки високоазотисті сталі Х21Г17АН2 у плазмово-дуговій печі. *Сучасна електрометалургія*, 2, 23–26. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2020.02.04>
11. Грановский В.К. (1982) *Исследование физико-химических процессов и разработка технологии плазменно-дуговой гарнисажной плавки высокоазотистых сталей и сплавов*. Дис. ... канд. техн. наук. Киев.
12. Бурнашев В.Р., Жадкевич М.Л., Шаповалов В.А. (2002). Плазменно-дуговая гарнисажная плавка и литье тугоплавких металлов и сплавов. *Пробл. спец. электрометаллургии*, 2, 35–38.
13. Zeng, Liu, Chenglei, Fan, Chunli, Yang et al. (2022) *Dissimilar welding of high nitrogen stainless steel and low alloy high strength steel under different shielding gas composition:*

- Process, microstructure and mechanical properties. Defence Technology*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2022.10.010>
14. Ющенко К.А., Солоха А.М., Казеннов Н.П. (1989). Технологические особенности сварки высокоазотистых сталей. *Сб. тр. Международной конференции «Высокоазотистые стали 89», 1–3 октября 1989 г., г. Варна, Болгария*. Т. 2, сс. 12–15.
  15. Ерохин А.А. (1975) *Плазменно-дуговая плавка металлов и сплавов*. Москва, Наука.
- References**
1. Uggowitzer, P.J., Magdowski, R., Speidel, M.O. (1996) Nickel free high nitrogen austenitic steels. *ISIJ Inter.*, 36(7), 901–908. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.36.901>
  2. Gavriljuk, V., Petrov, Y., Shanina, B. (2006) Effect of nitrogen on the electron structure and stacking fault energy in austenitic steels. *Scr. Mater.*, 55, 537–540. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2006.05.025>
  3. Nithi Saenarjhan, Jee-Hyun Kang, Sung-Joon Kim (2019) Effects of carbon and nitrogen on austenite stability and tensile deformation behavior of 15Cr–15Mn–4Ni based austenitic stainless steels. *Materials Sci. and Eng., A*, 742, 608–616. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.11.048>
  4. Patnaik, L., Maity, S.R., Kumar, S. (2020) Status of nickel free stainless steel in biomedical field: A review of last 10 years and what else can be done. *Mater. Today Proc.*, 26, 638–643. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.205>
  5. Chail, G., Kangas, P. (2016) Super and hyper duplex stainless steels: structures, properties and applications. *Procedia Structural Integrity*, 2, 1755–1762. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.221>
  6. Mohammed, R., Madhusudhan Reddy, G., Srinivasa Rao, K. (2017) Welding of nickel free high nitrogen stainless steel: Microstructure and mechanical properties. *Defence Technology*, 13(2), 59–71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2016.06.003>
  7. Sheiko, I.V., Grigorenko, G.M., Shapovalov, V.A. (2016) Alloying of steels and alloys with nitrogen from the arc plasma. Theory and practice (Review. Pt 1). *Sovrem. Elektrometall.*, 1, 32–37 [in Russian].
  8. Paton, B.E., Grigorenko, G.M., Sheiko, I.V. et al. (2013) *Plasma technologies and equipment in metallurgy and foundry*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
  9. Nabil Ghali, S., Eissa M., El-Faramawy, H. et al. (2013) Production and application of advanced high nitrogen steel. In: *Proc. of Inter. Conf. on Sci. and Technology of Ironmaking and Steelmaking At. Jamshedpur, India*, 1. DOI: [https://www.researchgate.net/publication/262698868\\_Production\\_and\\_Application\\_of\\_Advanced\\_High\\_Nitrogen\\_steel](https://www.researchgate.net/publication/262698868_Production_and_Application_of_Advanced_High_Nitrogen_steel)
  10. Burnashev, V.P., Nikitenko, Yu.O., Yakusha, V.V. et al. (2020) Some aspects of melting high-nitrogen steel Kh21G17AN2 in plasma arc furnace. *Suchasna Elektrometall.*, 2, 23–26 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2020.02.04>
  11. Granovsky, V.K. (1982) *Study of physical-chemical processes and development of technology of plasma-arc skull melting of high-nitrogen steels and alloys*. In: Syn. of Thesis for Cand. of Tech. Sci. Degree. Kyiv [in Russian].
  12. Burnashev, V.R., Zhadkevich, M.L., Shapovalov, V.A. (2002) Plasma-arc skull melting and casting of refractory metals and alloys. *Advances in Electrometallurgy*, 2, 30–33.
  13. Zeng, Liu, Chenglei, Fan, Chunli, Yang et al. (2022) *Dissimilar welding of high nitrogen stainless steel and low alloy high strength steel under different shielding gas composition: Process, microstructure and mechanical properties. Defence Technology*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2022.10.010>
  14. Yushchenko, K.A., Solokha, A.M., Kazennov, N.P. (1989) Technological peculiarities of welding of high-nitrogen steels. In: *Proc. of Inter. Conf. on High-Nitrogen Steels 89 (1–3 October, 1989, Varna, Bulgaria)*, Vol. 2, 12–15 [in Russian].
  15. Erokhin, A.A. (1975) *Plasma-arc melting of metals and alloys*. Moscow, Nauka [in Russian].

## PLASMA-ARC SKULL MELTING AND CASTING OF AUSTENITIC STEEL WITH SUPER EQUILIBRIUM NITROGEN CONTENT

V.O. Shapovalov, V.R. Burnashev, T.I. Hrishchenko, V.V. Yakusha, Yu.O. Nikitenko  
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: [shapovalov@paton.kiev.ua](mailto:shapovalov@paton.kiev.ua)

Shown is the possibility of melting and casting high-nitrogen Kh21G17AN2 steel under the conditions of plasma-arc skull melting. Boundary conditions of nitriding Kh21G17N2 steel in order to produce sound castings were determined. Castings in the form of 12 mm wire were produced. Casting quality and properties were studied. Investigation of weldability of the produced steel with super equilibrium nitrogen content was conducted at manual argon-arc welding. 15 Ref., 5 Tabl., 7 Fig.

*Keywords: plasma-arc skull melting, Kh21G17N2 steel, nitrogen, casting, properties, weldability*

Надійшла до редакції 12.06.2023

## СУЧАСНІ НАПРЯМИ РОЗВИТКУ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

27 листопада 2023 р. в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ була проведена науково-технічна конференція «Сучасні напрями розвитку адитивних технологій», присвячена 105-й річниці від дня народження академіка Бориса Патона.

Ознайомитись з он-лайн трансляцією конференції можна на youtube каналі ІЕЗ (<https://www.youtube.com/@pewiphd791>).

Пленарні доповіді конференції надруковані в журналі «Автоматичне зварювання» № 11, 2023 (<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as/2023/11>), який разом зі збіркою тез доповідей (<http://pwi-scientists.com/ukr/at2023>) видано до початку конференції.

Під час роботи конференції в ІЕЗ ім. Є.О. Патона була проведена виставка «Зварювання та споріднені технології».